

논문 2000-9-1-05

수정진동자 분석기를 이용한 폴리우레탄 합성반응의 특성분석

조홍식 · 박진영 · 한대상 · 박지선 · 이행자 · 김광 · 장상목

Analysis of the Characteristics of Polyurethane Synthesis Using Quartz
Crystal AnalyzerHong-Sik Cho, Jin-Young Park, Dae-Sang Han, Ji-Sun Park, Hang-Ja Lee, Kwang
Kim, and Sang-Mok Chang

요 약

본 연구에서는 폴리우레탄 합성반응의 특성을 수정진동자 분석기(QCA)의 공진주파수와 공진저항을 동시에 측정하여 분석하였다. 폴리우레탄 합성반응 초기에 생성된 폴리우레탄이 자동촉매반응을 일으켜 공진주파수가 급격히 감소한다는 것을 알 수 있었다. 프리폴리머(prepolymer, PP) 합성반응에서는 어느 순간 급속히 공진주파수가 감소하다 서서히 안정화되었다. 사슬연장제가 첨가된 세그먼트드 폴리우레탄(segmented polyurethane, SPU) 합성반응에서는 어느 순간 공진주파수가 급속히 감소하다가 다시 증가하였다. 이는 소프트세그먼트(soft segment, SS)에 사슬연장제인 1, 4-butandiol이 반응하여 하드세그먼트(hard segment, HS)로 변화됨으로써 강직한 HS 분자구조의 생성에 따라 공진주파수가 증가하였다고 생각된다. 또한 공진저항은 각각의 메카니즘을 해석하는데 사용하였다. 본 연구 결과, 폴리우레탄의 반응특성을 수정진동자 분석기(QCA)를 이용함으로써 온라인 분석할 수 있었으며, 반응메카니즘을 해석할 수 있었다.

Abstract

In this study, we investigated the characteristics of polyurethane synthesis by simultaneously measuring resonant frequency and resonant resistance with a quartz crystal analyzer. The rapid decrease of resonant frequency was appeared because automatic catalytic reaction was caused by the polyurethane formed in initial stage of polyurethane synthesis. In prepolymer(PP) synthesis, the resonant frequency was slowly stabilized after a rapid decrease at a certain point of time. But in segmented polyurethane synthesis in which chain-extender was involved, the resonant frequency increased again after a rapid decrease at a certain point of time. It was considered that this tendency took place because the chain-extender, 1,4-butandiol, caused a soft segment to change to a hard segment. The resonant resistance was used in the analysis of mechanism. From the results, the characteristics of polyurethane synthesis could be analyzed on-line using a quartz crystal analyzer, and the synthesis mechanism could also be interpreted.

Keywords: polyurethane synthesis, quartz crystal analyzer(QCA), soft segment, hard segment

1. 서 론

동아대학교 화학공학과 (Dept. of Chemical Eng.,
Donga Univ.)

<접수일자 : 1999년 11월 11일>

폴리우레탄은 다중 블록 공중합체로서 고무 성질과
같이 유연한 분자구조를 가지는 소프트 세그먼트(soft

segment, SS)와 파라결정 혹은 유리 영역의 물리적 가교를 형성하고, 수소결합에 의하여 우레탄기가 강하게 응집한 강직한 분자구조를 가지는 하드 세그먼트(hard segment, HS)가 있다. 폴리이소시아네이트(polyisocyanate)와 폴리올의 반응생성물인 프리폴리머는 양말단에 이소시아네이트기를 지니고 있는 폴리우레탄올리고머로 경화제와 수분 등과 반응하여 고분자량의 폴리우레탄을 생성하면서 반응을 일으켜 수지나 탄성체로 변형한다. 폴리우레탄은 섬유, 발포제, 코팅 용도로 쓰이는 탄성 재료, 접착제, 건축용 단열재, 가구용 쿠션, 신발, 자동차 범퍼, 생체 적합성 의료재료 등에 많이 사용되어지고 있다^[1-3].

폴리우레탄은 합성방법, 소프트세그먼트의 종류와 분자량, 하드세그먼트의 구조 등 조건에 따라 다양한 특성과 용도의 폴리우레탄이 형성되며 각기 상이한 기계적 성질, 점탄성 거동과 상온함 정도의 특성을 나타낸다. 폴리우레탄계 수지는 원료의 종류에 따라 수지의 경도와 강도 등의 조절이 가능하다.^[4,5] 폴리우레탄을 합성하여 열분석기, 전자현미경, x-ray, 광산란법 및 각종 레오메타 등으로 분석하지만 이제까지의 분석은 합성의 결과를 전화를 개념으로 해석하는 방법이었으며, 합성반응 시간에 따른 변화를 분석하는 방법은 없었다.

수정진동자 분석기(Quartz Crystal Analyzer)는 Sauerbrey에 의해 수정진동자가 분석소자로서 이용 가능하다^[6]는 사실이 이론적으로 구명된 후, 수정진동자는 주로 가스분석에 이용되어 왔다. Kanazawa 등이 용액 중에서도 수정진동자가 발진 가능하다^[7]는 사실을 실험적으로 입증한 후, 분석소자로서의 수정진동자의 응용이 본격화되었다. 특히 최근에는 Muramatsu에 의해 수정진동자의 표면에 누적된 막의 유변학적 동특성을 해석할 수 있는 이론적인 근거가 제시되었다.^[8]

본 연구에서는 수정진동자 분석기를 이용하여 폴리우레탄 합성 과정의 정성, 정량적 특성변화를 관찰 해석함으로써 폴리우레탄 반응메카니즘을 추정할 수 있는 새로운 기법을 제시하고자 한다.

2. 이 론

2-1. 수정진동자의 원리

수정진동자의 표면이 액체와 접하여 진동하는 경우, 용액이 갖는 점성 때문에 용액과 수정진동자 표면 사이에는 전단응력에 의한 기계적인 저항이 생긴다. 이

전단응력에 의한 기계적인 저항이 일종의 질량부하 작용을 하게 되고 이에 따라 공진주파수도 변하게 된다.

액체 중에서 횡 방향으로 탄성진동을 하는 경우, 액체와 접한 수정진동자의 발진주파수 특성은 Kanazawa 등에 의해 식 (1)와 같이 유도되었다.^[7]

$$\Delta F = -F_s \frac{3}{2} (\eta \rho_L / \pi \mu \rho_Q)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서 η 는 액체의 점성, μ 는 수정의 탄성, ρ_L 은 액체의 밀도, ρ_Q 는 수정의 밀도이다.

용액 중에서 발진주파수변화는 $(\rho_L \eta)^{\frac{1}{2}}$ 에 비례하여 변화하며 이 관계식은 실험적으로 얻어진 결과와도 잘 일치하고 있다. 즉, 수정진동자가 용액중에 있는 경우 용액의 점성과 밀도의 변화에 의해서도 공진주파수가 변화한다는 것이다. 한편, 용액 중에서 수정진동자 위에 탄성막이 형성된 경우에는 기체 중에서 적용되는 Sauerbrey^[6]식을 적용할 수 있다.

널리 알려진 수정진동자의 전기적 등가회로와 역학적인 등가회로모델로부터, 공진상태에서의 점성변화를 의미하는 수정진동자의 공진저항 R_1 은 다음과 같이 유도된다.

$$R_1 = (2\pi F_s \rho_L \eta)^{\frac{1}{2}} A / k^2 \quad (2)$$

여기서 A는 수정진동자의 표면적, k는 전기-기계 변환 계수이다.

식 (2)에서 공진저항 R_1 은 액체의 점도와 밀도에 의존하여 변화한다는 것을 알 수가 있다. 즉, 수정진동자의 공진주파수 변화와 공진저항 R_1 을 측정하여 비교함으로써 용액의 점도와 밀도의 변화를 고찰할 수 있다.

중량변화계측의 변수인 수정진동자의 공진주파수와 다른 공진저항이라는 변수가 최근에 수정진동자 전극표면 위에 피막된 박막의 점탄성 분석에서 주목받고 있다. 식(1)과 (2)로부터 수정진동자 전극표면 위에 각종 박막이 피막되었을 때 박막의 점탄성 특성에 따른 대표적인 공진주파수 변화와 공진저항 변화와의 정성적인 상관관계를 Fig. 1에 도식하였다.

공기 중에서 진동하고 있는 수정진동자를 용액에 담그면 수정진동자는 전단응력에 의해 진동할 때 역학적 저항을 받아 진동에너지가 감소하게 된다. 역학적 저항에 의한 진동에너지의 감소는, 용액에 의한 일종의

질량부하효과로 작용하여 공진주파수와 공진저항 모두 식(1)과 (2)에 준하여 변화한다.^[9] 따라서, F-R도에서 점 a에서 점 b로 이동하게 된다. 그리고, 용액 속에서 수정진동자 전극 위에 박막이 피막되면 피막된 박막의 점탄성에 따라 밑줄 친 부분 내에서 공진주파수와 공진저항이 변화하게 된다. 이와 같이 공진주파수와 공진저항을 동시에 측정하여 분석함으로써 다양한 물성의 박막의 유변학적 동특성을 해석할 수 있다.^[10]

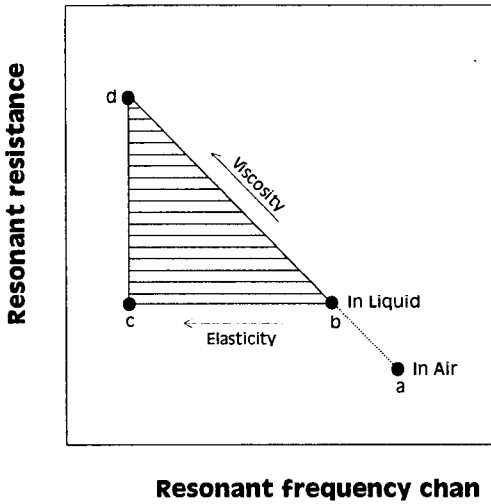


Fig. 1. The qualitative relationship of resonant frequency change and resonant resistance for various film coated AT-cut quartz crystal.

2-2. 폴리우레탄 합성의 메카니즘

Fig. 2에 나타난 바와 같이 폴리올에 디이소시아네이트를 반응시켜 양말단에 NCO기를 갖는 분자량 15,000~20,000의 예비중합체(prepolymer)를 합성하고, 사슬연장제로서 짧은 사슬의 디올 또는 디아민을 반응시켜 폴리우레탄을 합성시킨다. 예비중합체 제조방법은 중합물의 구조를 보다 균일하게 조절할 수 있다는 장점이 있다. 폴리우레탄 점탄성의 기본 특성은 소프트 세그먼트, 사슬그물구조, 사슬 결합력 및 가교결합 구조와 관계되며, 소프트 세그먼트는 사슬길이 1,000~2,000 nm, 하드 세그먼트는 사슬길이 150 nm로 화학적으로 수소결합을 형성하며, Fig. 3와 같이 확장배향으로 중합할 수 있다.

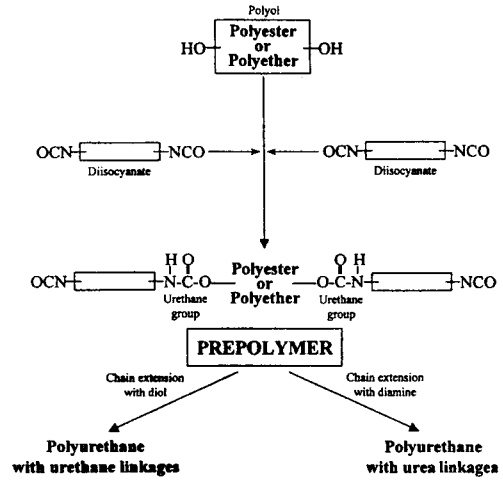


Fig. 2. Prepolymerization route for the formation of a polyurethane

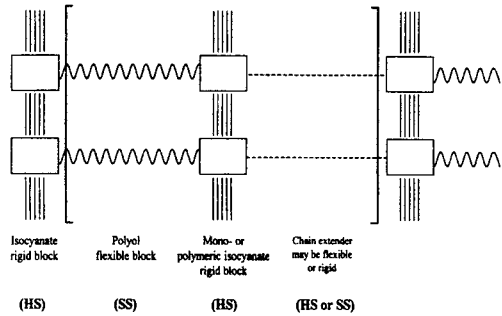


Fig. 3. The basic unit in a urethane block copolymer.

3. 실험

3-1. 시약 및 장치

Fig. 4에 본 실험에서 사용한 실험장치도를, Fig. 5에 수정진동자 측정용 반응셀의 단면을 나타내었다. AT-cut 수정진동자는 9 MHz의 공진주파수를 가진 수정판 양면에 Ti을 10 nm 스퍼터링한 후, 금을 2000 nm 스퍼터링하여 전극을 형성하여 사용하였고, 이때의 전극면적은 0.2 cm²이고 공진주파수는 8.87 MHz였다. 폴리우레탄은 자체 제작한 수정진동자 측정용 반응셀 속에 시료를 넣어 반응시간에 따른 변화를 in-situ 측정하면서 합성하였다.

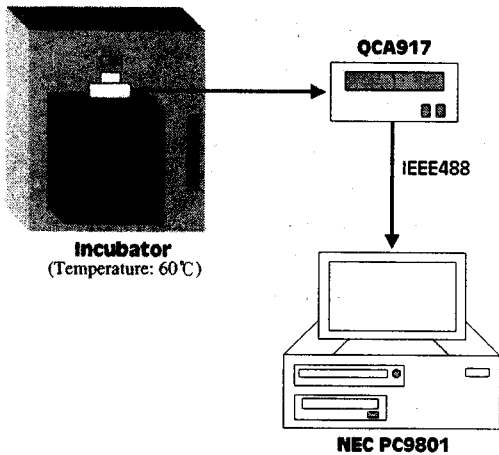


Fig. 4. Schematic diagram of experimental system.

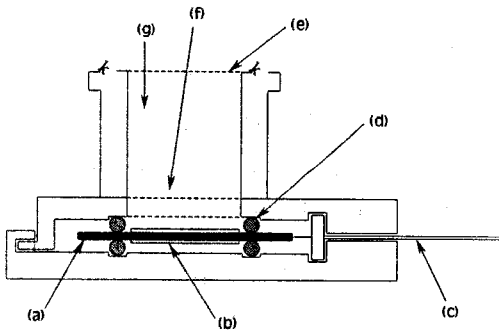


Fig. 5. Schematic diagram of 5ml liquid cell; (a) quartz crystal, (b) electrode, (c) lead wire, (d) silicone rubber, (e) laboratory sealing film, (f) materials and (g) N₂ gas.

소프트세그먼트는 폴리에테르계 디올로 미국 Quaker Oats사의 폴리테트라메칠렌에테르 글리콜 (PTMG, Mw=1000)과 한국 폴리올사의 글리콜프로필렌(GP-5000, Mw=5000)을 사용하였고, 수분을 제거하기 위해 60°C에서 24시간 동안 감압건조시켰다. 하드세그먼트는 미국의 Olin Chemical사 제품인 톨루엔다이소시아네이트(TDI, Mw=174.16)을 사슬연장제로는 미국 ACROS Organics사의 1,4-부탄디올을 사용하였다. 그 밖의 시약은 모두 특급시약을 사용하였다.

실험은 항온인큐베이터로 온도를 조절하여 가면서 합성하였고, 수정진동자 분석기(QCA 917, Seiko EG&G)를 사용하여 공진주파수와 공진저항 변화를 동시에 측정하여, 그 측정결과를 IEEE 488 인터페이스로

연결된 마이크로 컴퓨터(PC9801, NEC)로 처리하였다.

3-2. 실험방법

첫 단계에서 TDI 3.56 몰에 폴리아올 중 GP(Mw=5000)의 양을 0.2 몰로 고정시키고, PTMG(Mw=1000)의 양을 1.7 몰로 조정하여 [NCO]_P : [OH]_P = 1.87 : 1로 반응기에 투입하여 반응시켰으며, 두 번째 단계에서는 사슬연장제 1,4-부탄디올을 [NCO]_T : [OH]_T의 비가 1.78 : 1로 고정되도록 투입하여 반응시켰다.

Table 1. Composition of polyurethane reaction

Unit: mol

First Stage	PP
TDI	3.56
GP-5000	0.2
PTMG-1000	1.7
[NCO] _P : [OH] _P	3.56/1.9 = 1.87:1
Second Stage	SPU
TDI	3.56
GP-5000	0.2
PTMG-1000	1.7
1,4-Butandiol	0.1
[NCO] _T : [OH] _T	3.56/(1.9+0.1) = 1.78:1

Table 2. Composition of experimental polyurethane.

Unit: μl

First stage	PP
TDI	29.8
GP-5000 PTMG-1000 Toluene	150
[NCO] _P : [OH] _P	1.87 : 1
Second stage	SPU
TDI	29.8
GP-5000 PTMG-1000 Toluene	150
[NCO] _T : [OH] _T	1.78 : 1
1, 4-butandiol	0.4

본 실험은 Table 1에 나타난 비율로 시료를 수정진동자 측정용 반응셀에 넣은 다음, 산소를 제거하기 위해 질소 가스를 반응셀에 불어 넣고 실링 필름으로 입구를 봉하여, 60 °C에서 약 2시간 동안 합성하면서 수정진동자의 공진주파수와 공진저항을 동시에 측정하여 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

GP-5000과 PTMG-1000을 녹인 톨루엔 용액 150 μl 와 TDI 29.8 μl 를 수정진동자가 장착된 반응셀에 넣어 약 3시간 동안 합성반응을 시켰을 때의 공진주파수와 공진저항의 시간에 따른 변화를 각각 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다.

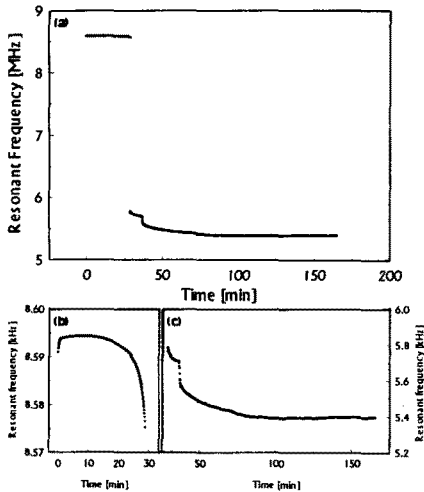


Fig. 6. The response of (a) Resonant frequency shift - Time for prepolymer reaction; Enlarged (b) and (c) are represented before and behind 30 minute of (a).

Fig. 6(a)는 반응전체에 대하여 시간에 따른 공진주파수의 변화를 나타낸 것이다. 반응초기 약 30분간은 공진주파수 변화가 거의 일어나지 않았으나, 반응시간 30분을 전후하여 공진주파수가 3 MHz 이상 급속히 감소하였고, 반응시간 약 100분 후 공진주파수가 정상치에 도달하였다. 이들 변화를 보다 상세하게 검토하기 위하여 반응시간 30분 전후를 분리하여 각각 Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)로 도시하였다. Fig. 6(b)를 보면 초기에 약간의 공진주파수가 증가하는데 이는 용매의 증발에 따

른 수정진동자에 대한 질량부하 효과가 감소하였기 때문이고, 그 이후 10여분의 일정한 값을 보이는 것은 용매의 증발과 반응에 따른 점성증가 효과가 서로 상쇄되기 때문이라고 생각된다. 그 이후 공진주파수가 급격히 감소하는 것은 어느 정도 생성된 폴리우레탄의 자동축매반응에 의한 점성증가 현상이 뚜렷해지고 점성증가가 질량부하 효과를 나타내기 때문이다. Fig. 6(c)에서 반응 100분 후, 공진주파수가 일정한 것은 100분 후 반응이 어느 정도 완결되었기 때문으로 생각된다.

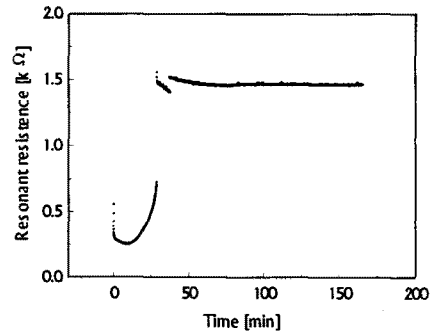


Fig. 7. The response of Resonant resistance - Time for prepolymer reaction.

Fig. 7을 보면 반응초기 공진저항이 급격히 감소하다가 그후 10분간은 서서히 조금씩 감소하는 경향을 보이는데, 이는 공진주파수 변화에서 설명하였지만 반응초기 폴리우레탄이 생성되기 전에 용매의 증발에 따른 질량부하 효과 감소가 점성 저하효과로 나타났고, 그 이후 10분간 질량부하 감소와 점성증가가 어느 정도 균형을 이루면서 서서히 감소하는 경향을 나타냈다고 생각된다. 그 이후 공진저항이 급격히 증가하는데 이는 앞에서 설명한 대로 어느 정도 생성된 폴리우레탄의 자동축매반응에 의한 점성증가를 의미하며, 이 현상이 공진주파수의 급격한 감소를 수반하게 되는 것이다. 왜냐하면, 질량보존법칙에 따르면 실제적인 질량증가는 없고 점성증가에 따른 질량부하 효과 증가만에 의한 공진주파수 변화로 생각되어지기 때문이다. Fig. 6에서 반응 30분 후 공진주파수 변화의 변곡은 Fig. 7에서의 공진저항 변화와 연관지어 이해될 수 있을 것이다.

본 실험방법이 기존의 반응에 적용할 수 있는지 여부를 점검하기 위해서 폴리우 용액 150 μl 와 TDI 29.8 μl 를 수정진동자 반응셀에 넣어 약 3시간 동안 합성반

용한 결과와 폴리에올 35 ml와 TDI 7 ml를 100 ml 일반 용기에 넣어 60 rpm의 속도로 교반하면서 3시간 동안 합성반응한 결과를 비교 분석하여 Fig. 8에 나타내었다.

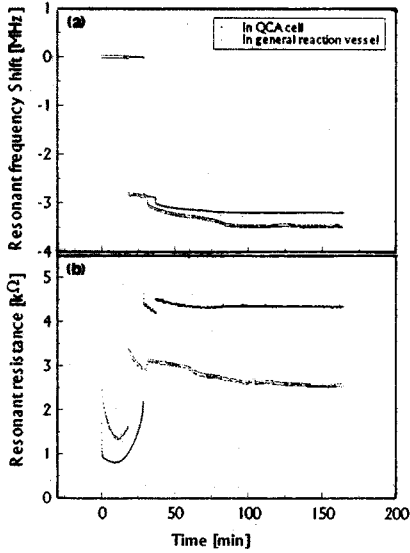


Fig. 8. The influence of the reactant volume for the responses of polyurethane reaction; (a) Resonant frequency shift - Time and (b) Resonant resistance - Time.

반응시간에 따른 공진주파수 변화를 나타낸 Fig. 8(a)와 반응시간에 따른 공진저항 변화를 나타낸 Fig. 8(b)를 보면 두 반응시스템에서의 변화의 절대값은 서로 다르지만 변화의 양상은 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 수정진동자 반응셀을 이용한 미량반응 결과로부터 일반 반응시스템의 반응메카니즘을 유추할 수 있다는 사실을 알 수 있었다.

반응온도의 영향을 살펴보기 위하여 폴리에올 용액 150 μ l, TDI 29.8 μ l, 그리고 사슬연장제로 1,4-부탄디올 0.4 μ l를 5 ml 반응셀에 넣어 40, 50, 60 $^{\circ}$ C에서 각각 3시간 동안 합성반응한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 반응시간에 따른 공진주파수 변화를 나타낸 Fig. 9(a)와 공진저항 변화를 나타낸 Fig. 9(b)를 보면, 각각의 온도에서의 변화경향은 비슷한 형태를 보이고 있는데 그것으로부터 각각의 온도에서도 반응메카니즘은 거의 같음을 알 수 있다.

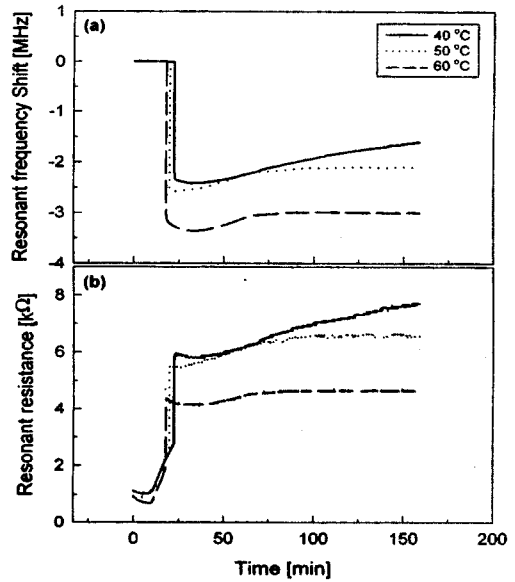


Fig. 9. The influence of reaction temperature for the responses of polyurethane reaction; (a) Resonant frequency shift - Time and (b) Resonant resistance - Time.

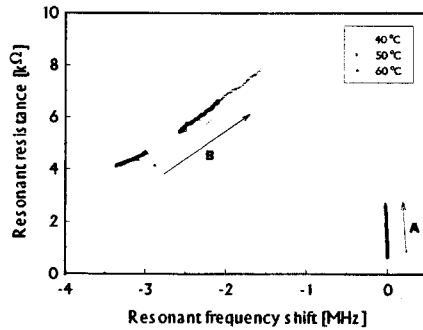


Fig. 10. The F-R representations of the influence of reaction temperature.

폴리우레탄 반응에 있어서의 점탄성 변화를 살펴보기 위하여 공진주파수와 공진저항(F-R)의 상관관계를 Fig. 10에 나타내었다. A 부분에서는 공진저항이 거의 수직으로 증가하다가 B 부분에서 공진주파수 변화의 감소에 따라 공진저항 또한 함께 증가하는 현상을 보이는데, 이는 기존의 F-R 상관관계로는 설명할 수 없다. 일반적으로 반응이 진행 되면 점성이 증가하여 공진저항도 증가하며, 이에 따른 질량

부하 효과로 공진주파수 변화도 증가한다. 그러나, 본 반응의 경우, 반응이 진행됨에 따라 반응생성물이 스폰지상으로 부풀어지는데, 반응생성물이 스폰지상으로 부풀어짐에 따라 비중이 감소하게 되고, 그 결과로 인해 질량부하 효과가 줄어들어 공진주파수 변화가 감소하면서도 공진저항은 증가하는 현상을 보이는 것으로 사료되어진다.

프리폴리머(prepolymer, PP) 합성반응과 사슬연장제가 첨가된 세그먼트드 폴리우레탄(segmented polyurethane, SPU) 합성반응을 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. PP 합성반응으로는 폴리올 150 μl 와 TDI 29.8 μl 를 사용하였으며, SPU 합성반응으로는 폴리올 150 μl , TDI 29.8 μl , 그리고 사슬연장제로 1,4-부탄디올 0.4 μl 를 사용하여 5 ml 반응셀에 넣어 2 시간 동안 합성하여 비교 분석하였다.

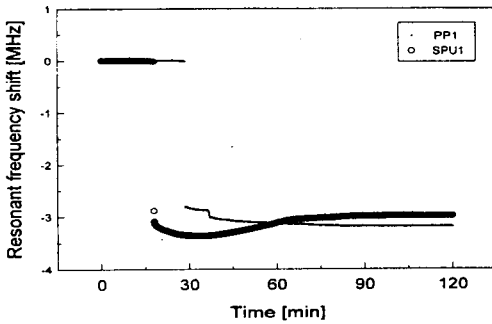


Fig. 11. Comparison of the prepolymer(PP) reaction and segmented polyurethane(SPU) reaction.

반응시간에 따른 공진주파수 변화를 나타낸 Fig. 11을 보면, PP 합성반응에서는 약 30분을 전후하여 공진주파수가 약 3 MHz 정도의 급격한 감소가 일어나다 시간이 경과함에 따라 다시 서서히 감소하다 약 100분을 전후하여 공진주파수가 안정하고 있음을 알 수 있다. 이에 반해 SPU 합성반응에서는 감소하던 공진주파수가 약 30분을 전후하여 증가하면서 정상치에 도달함을 알 수 있다. 이는 SPU 합성반응에서 첨가된 사슬연장제인 1,4-부탄디올이 프리폴리머 단계에서 합성된 SS와 HS중에 SS에 반응하여 유연한 분자구조의 SS를 강직한 분자구조의 HS로 변화시킴으로써 PP 합성보다 SPU 합성반응에서 더 많은 HS가 합성되고, 결과적으로 생성된 폴리우레탄이 탄성적인 특성을 나타내므로 공진주파수가 증가하는 현상을 나타내고 있다고 생각된다.

결 론

본 실험에서는 수정진동자 분석기(QCA)를 사용하여 폴리우레탄 합성반응의 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 폴리우레탄 합성반응에서 초기에 생성된 폴리우레탄의 자동축매반응에 의해 공진주파수가 급격히 감소함을 알 수 있었다.
2. 프리폴리머 합성반응에서는 어느 한 시점에서 급속히 공진주파수가 감소하다 서서히 공진주파수가 감소하면서 정상치에 도달하였으나, 사슬연장제가 첨가된 세그먼트드 폴리우레탄 합성반응에서는 어느 한 시점에서 급속히 공진주파수가 감소하다가 다시 증가하는 현상을 보였는데, 이는 소프트세그먼트에 사슬연장제인 1,4-부탄디올이 반응하여 하드세그먼트로 변화시킴으로써 강직한 분자구조의 HS가 탄성적인 특성을 나타내어 공진주파수가 증가하는 현상을 나타내었다고 사료된다.

이상, 폴리우레탄의 반응특성을 수정진동자 분석기(QCA)를 이용함으로써 in-situ 분석할 수 있었으며, 반응메카니즘도 유추할 수 있어 간단히 반응메카니즘을 해석할 수 있는 새로운 기법으로 기대되어진다.

참고문헌

- [1] C. S. Schollenberger, "Polyurethane-and Isocyanate-Based Adhesives, Handbook of Adhesives", ed. by I. Skeist, vol. III, p. 359, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [2] Y. Camberin, J. P. Pascault, J. M. Letoffé, and P. Claudy, *J. Polym. Sci. : Polym. Phys. Ed.*, vol. 20, pp. 1445, 1982.
- [3] G. Oertel, "Polyurethane Handbook", Hanser Publishers, 1985.
- [4] R. G. Person, *J. Chem. Ed.*, vol. 45, pp. 643, 1968.
- [5] M. S. Yen, and S. C. Kuo, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 61, pp. 1639, 1996.
- [6] G. Sauerbrey, *Z. physik*, vol. 155, pp. 206, 1959.

- [7] K. K. Kanazawa, and J. G. Gorden II, *Anal. Chem. Acta*, vol. 175, pp. 99, 1995.
- [8] H. Muramatsu, E. Tamiya, and I. Karube, *Anal. Chem.*, vol. 60, pp. 2142 1988.
- [9] J. M. Kim, S. M. Chang, and H. Muramatsu, *Polymer*, vol. 40, pp. 3291, 1999.
- [10] L. D. Landau, and E. M. Lifshitz, "Fluid Mechanics", 88, Pergamon, Oxford, England, 1959.

著 者 紹 介



조 홍 식

1991 부경대학교 도장공학과 (학사), 1996 부경대학교 표면공학과 (석사), 1998 ~ 현재 동아대학교 화공과 (박사 과정)
1999~현재 (주)트윈텍 대표이사



이 행 자

1991 동아대학교 화공과(학사)
1993 동아대학교 화공과(석사)
1999 ~ 현재 동아대학교 화공과 (박사 과정)



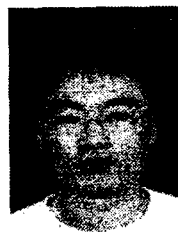
박 진 영

1999 동아대학교 화공과(학사)
1999 ~ 현재 동아대학교 화공과 (석사 과정)



김 광

1972 성균관대학교 화공과(학사),
1976 성균관대학교 화공과(석사),
1982 성균관대학교 화공과(박사)
1984 ~ 현재 동아대학교 화학공학 학과 교수



한 대 상

1998 동아대학교 화공과(학사)
1998~ 현재 동아대학교 화공과 (석사 과정)

장 상 목

『센서학회지 제3권 제2호』
논문 94-3-2-05 p.39 참조
1982 서울대학교 화공과(학사)
1984 한국과학원(석사)
1990 일본 동경공업대학(박사)
1984 ~ 현재 동아대학교 화학공학과 교수, 학과장



박 지 선

1997 동아대학교 화공과(학사)
1999 동아대학교 화공과(석사)